

# 油菜河洞内拱坝安全分析计算及评价

符昌胜 马富强 孙光礼

贵州省水利水电勘测设计研究院有限公司

**摘要:** 安顺市油菜河水库位于贵州喀斯特岩溶地区,采用洞内拱坝成库,拱坝四周均嵌入岩体中,普通的拱坝多拱梁计算软件无法进行坝体应力计算,2019年设计单位对拱坝进行了三维弹性有限单元分析,计算成果为工程安全运行提供了技术支撑,同时计算方法和计算成果也可为类似工程提供借鉴。

**关键词:** 溶洞;拱坝;有限单元分析

**【DOI】** 10.12254/j.issn.2096-6539.2022.06.051

## 一、工程概况

油菜河水库工程地处贵州高原珠江与长江流域分水岭南侧的高台斜坡上,是一项以灌溉、发电为主的中型水利工程。油菜河水库是在复杂的多层强岩溶地区的岩溶洞穴内建坝成库,工程从1988年开始作为科研性质的试验坝进行设计,1995年完成筑坝,经三次接近正常蓄水位的蓄水试验观测,邻谷没有产生渗漏,仅坝基、坝肩有少量渗漏,为 $0.4\text{m}^3/\text{s}$ 左右。2002年对大坝坝基、坝肩及库区进行帷幕灌浆处理后,水库具备正常蓄水条件。为使工程发挥效益,安顺市西秀区水利局于2019年委托设计单位进行大坝安全评价工作。

油菜河水库的挡水建筑物是在溶洞内建成的砌石拱坝。砌石拱坝的顶部与溶洞顶部相连接止水,水库的正常蓄水位、设计洪水位及校核洪水位均高于坝顶高程。油菜河水库大坝与常规拱坝不同,本工程大坝实际为一个四周约束的非标准空间壳体结构,《混凝土拱坝设计规范》7.2.1条规定的拱梁分载法已不能够很好地反映大坝的结构特点。因此,本次大坝安全评价,采用ANSYS结合现场监测资料应有限单元计算方法对坝体温度、应力和坝体稳定进行复核计算。

## 二、拱坝设计

### (一) 坝址气候条件

油菜河流域属亚热带温和气候区,冬无严寒,夏无酷暑,气候宜人。根据流域的安顺气象站资料分析,多年平均气温 $14^\circ\text{C}$ ,极端最高气温为 $34.3^\circ\text{C}$ (1953年8月13日),极端最低气温为 $-7.6^\circ\text{C}$ (1977年2月9日),最冷月一月均温 $4.2^\circ\text{C}$ ,最热月七月均温 $21.9^\circ\text{C}$ 。大坝所在溶洞内多年平均气温 $16^\circ\text{C}$ ,洞内气温年变幅为 $4^\circ\text{C}$ 。

### (二) 坝址地质条件

大坝为四周嵌固的浆砌石拱坝,坝体四周岩体均为T2g3厚层白云质灰岩,岩石强度较高,抗风化能力强,但坝基溶蚀裂隙和小溶洞发育,主要发育有陡倾角NE、NE及EW向裂隙,其和坝轴线相互切割,特别是NE向裂隙延伸长,切割深,平行于伏流方向发育。

### (三) 拱坝体形设计

油菜河水库正常蓄水位 $1290\text{m}$ ,设计洪水位( $P=2\%$ ) $1305.08\text{m}$ ,核洪水位( $P=0.2\%$ ) $1306.45\text{m}$ ,死水位 $1272\text{m}$ 。拱坝顶部高程 $1269\text{m}$ ,基础底面高程 $1230.7\text{m}$ 。结合溶洞断面的不对称和无规则的特点,拱坝体形采用三圆心、双向曲率拱坝,坝体材料为外壳M10浆砌粗料石,内腹M10浆砌块石,最大坝高 $38.3\text{m}$ ,底宽 $7\text{m}$ ,顶宽 $5.5\text{m}$ 。

## 三、工程运行状况

大坝建成后,前期由于缺少资金,灌浆工作一直未做,坝体渗漏严重,影响工程效益的发挥,并危及大坝安全,使油菜河水库成为病险库之一。2000年10设计院进行了大坝安全鉴定工作,安全鉴定主要结论:1、水库防洪能力满足《防洪标准》(SL201-94)要求;2、水库、坝址区域区域构造稳定,地震基本烈度VI度;3、大坝整体结构稳定满足规范要求,结构安全;4、帷幕灌浆未实施,坝基坝肩渗漏严重,水库不能正常蓄水;5、水库不能正常运行。大坝安全类别评定为:三类。根据大坝安全鉴定结论,于2002年2月开展除险加固。油菜河水库除险加固对大坝坝基、坝肩及库区进行帷幕灌浆处理后,水库具备正常蓄水条件。

油菜河水库自2005年除险加固完工蓄水以来,至今已运行15年,期间水库蓄、放水多次(因水库配套工程未发挥效益,水库大多数情况下在低水位运行),水库运行总体正常。大坝经过一次除险加固(2002~2003年),从现场检查看大坝存在分散型渗漏,但渗漏量较小,另外运行中出现大坝下游洞顶渗流异常现象,还存在泄洪中孔闸门陈旧、检修门不能正常启闭等问题。为及时掌握水库的运行情况,更好地进行大坝安全管理,根据水利部相关规定“大坝实行定期安全鉴定制度,首次安全鉴定应在竣工验收后5年内进行,以后应每隔6~10年进行一次”,对油菜河水库大坝进行大坝安全鉴定是十分重要和迫切的。

随后设计院先后开展现场勘查,坝体(含基岩)钻探、孔壁成像、压水试验、钻孔声波检测、取样室内试验等勘探工作手段,大坝下游冲坑地形检查、库区地质调查、金属结构现场检查、闸门锈蚀厚度测绘等工作,在此期间认真查阅了工程的设计、施工及竣工的有关文件和报告,基本掌握了水库枢纽及库区各建筑物的质量现状。

## 四、拱坝三维有限单元分析

### (一) 有限单元模型的建立

#### 1. 软件的选择

用于结构分析数值计算的软件很多，其中ANSYS在结构力学分析方面，可用于静力分析，可考虑结构的线性和非线性行为，如变形、应变、接触、塑性、超弹及蠕变等，非常适合应用于工程数值计算根据研究问题的特点和要求，因此本次选用ANSYS数值分析软件。

2. 坐标系的选择

本工程有限单元计算模型建立在笛卡尔坐标系下，X轴垂直于河流方向，由右岸指向左岸为正；Y轴顺水流方向，指向上游为正；Z轴为铅直方向，向上为正。

3. 计算域的选取

根据规范要求，采用线弹性有限单元计算坝体应力时，基础计算范围应不小于1.5倍坝高。有限单元计算主要目的为大坝坝体的应力应变分布状态，因此，坝前、坝后、左右岸拱端及底部地基取1.5倍坝高左右，顶部取至拱坝上部岩体实际高程1310.0m。

4. 边界条件

在由坝体和地基构成的整个计算域内，对基岩的上、下游面施加Y方向的约束，左、右岸边界施加X方向的约束，基岩底部施加X、Y、Z三个方向的约束。

5. 有限单元网格模型

根据油菜河拱坝的结构特点、基础的地质条件等情况，在本次计算分析中，对坝体和基岩采用6面体8节点单元进行有限单元离散。在有限单元模型建立时考虑了坝体的形状、材料的分区及多种荷载的施加区域等。同时，坝体及坝基近似假定为各向同性、均质、连续的线弹性体。三维有限单元整体网格共划分单元53176个、节点60745个。网格模型参见下图。

(二) 有限单元计算

1. 计算参数

拱坝周边岩体有限单元计算材料参数

材料名称	坝体	灰岩	泥灰岩	泥岩
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2400	2600	2500	2500
弹性模量 (GPa)	25	7	6	2.5
泊松比	0.167	0.27	0.28	0.3
线膨胀系数 (10 <sup>-5</sup> /°C)	0.78	0.72	0.78	0.78
内聚力c (Mpa)	2.4	1	0.85	0.5
内摩擦角f	1.6	0.95	0.8	0.65

2. 计算荷载组合

拱坝设计荷载组合分为基本组合和特殊组合，考虑到水库死水位也高于坝顶高程，不同于普通的拱坝死水位时大部分坝体位于水位之上，坝体温度场影响明显，而油菜河整个拱坝长期处于水下运行，温度场基本不变，因此本次油菜河拱坝的结构计算分别考虑了4种工况：①正常蓄水位+温降；②正常蓄水位+温升；③设计洪水水位+温升；④校核洪水水位+温升。

3. 温度应力计算

在有限单元模型网格建立的基础上，根据等效线性

温差和均匀温差值，计算不同情况下的温度场分布情况。温度荷载根据SL744《水工建筑物荷载设计规范》附录I的有关规定，分别计算了拱坝运行期典型拱圈截面设计正常温降、设计正常温升荷载，计算时封拱温度取坝体多年年平均温度。根据典型拱圈截面的温度荷载，采用线性差值的方式计算坝体的空间温度场荷载，并依此计算坝体的温度应力。

4. 有限单元计算控制标准

采用有限单元法计算时，应力控制指标可参照SL282-2018有关规定。根据SL282-2018，采用有限单元法计算时，按有限单元等效应力计算的坝体主压应力应符合下列应力控制指标的规定：坝体的主压应力不应大于筑坝材料的容许压应力，容许压应力等于筑坝材料强度值除以安全系数；对于基本荷载组合，安全系数采用3.5，非地震情况特殊荷载组合采用3.0，即，基本荷载组合容许压应力5.1MPa，特殊荷载组合容许压应力6MPa。对于基本荷载组合，容许拉应力为1.5MPa；非地震情况特殊荷载组合，容许拉应力为2.0MPa。

(三) 计算结果与分析

1. 有限单元应力极值成果分析

根据应力图可知，通过ANSYS计算出的主拉应力与主压应力的极值相对较高，可以看出较高的拉应力及压应力基本上出现在靠近基础部位。采用三维弹性有限单元法计算拱坝应力时，近基础部位存在着显著的应力集中现象，但在实际工程中，由于岩体内存在着大小不等的各种裂隙，应力集中现象将有所缓和，所以有限单元法计算拱坝所反映的严重应力集中现象并不一定符合实际。为此，我国一些学者（朱伯芳、傅作新）提出了有限单元等效应力法，根据有限单元计算的应力分量，通过对应力的有关分量积分，得到内力，然后用材料力学方法计算断面上的应力分量，经过这样处理，消除了应力集中的影响。因此，在本次分析中同时计算了有限单元等效应力。

有限单元等效应力具体计算步骤为：设拱坝的整体坐标系为(x1, y1, z1)，计算坝体应力的梁拱交点的局部坐标系为(x, y, z)。①将有限单元法计算的整体坐标系中的应力{σ1}=[σx1, σy1, σz1, τxy1, τyz1, τzx1]T，经坐标变换，得到局部坐标系的应力{σ}=[σx, σy, σz, τxy, τyz, τzx]T；②沿单位高度拱的径向截面和在中心线（或坝轴线）取单位宽度的水平梁截面，对{σ}的有关分量进行积分，得到拱圈和梁的内力（包括梁的竖向力、切向剪力、径向剪力、弯矩、扭矩和拱的轴向力、径向剪力、弯矩）；③按材料力学方法计算坝体应力。

2. 有限单元计算结果分析

坝体整体的变形趋势是向下游方向，但和普通拱坝顶部变形最大的不同的是，变形由四周向中间逐渐增大，最大位移出现在校核洪水工况，为6.23mm，分布在坝体中下部。

上游坝面第一主应力大部分区域为受压区,其值较小,四种工况下大约为0.08~0.09MPa左右,向四周逐渐减小。受拉区分布在四周拱端位置,在底部中间部位出现最大拉应力,四种工况下最大为7.58MPa,等效应力为1.49MPa,这主要由于形状在此形成尖角,网格形状有些畸形导致应力集中突出,但只发生在局部的个别单元。上游坝面的第一主拉应力基本上都低于1.5MPa。下游坝面第一主应力分布规律大致为中部受拉,向四周逐渐减小,拱端压应力为1.0MPa~1.8MPa左右。

下游坝面主拉应力分布规律大致由中部向四周逐渐减小,其数值都在1.0MPa以下,满足强度要求。下游坝面主压应力的分布规律表现为中部拱端最大,顶部和底部次之,坝面中间最小。最大压应力值约5.0MPa,但范围很小,其他各部分的主压应力都在4.5MPa以下。

坝体整体的变形趋势是向下游方向,由四周向中间变形逐渐增大,最大位移达6.23mm,分布在坝体中部,符合结构的变形规律。

总的来说,除了上游坝面个别点因为应力集中而导致拉应力超标,和下游坝面小范围内压应力在允许压应力值上下,其余部分的应力都在允许应力范围内,满足强度要求。

## 五、拱坝抗滑稳定分析

### (一) 抗滑稳定计算模式选取

计算中假定缓倾上游岩石层面为水平底滑面(此假定偏安全),拱端为拉脱面,抗滑岩体下游边缘为剪出面,假定几组不同方位角的裂隙面作为侧滑面计算其最小安全系数是否达标。

### (二) 计算假设和计算公式

根据滑动模式参考《水工设计手册》第5卷,右岸采用三维刚体极限平衡法计算。基本假定如下:滑移体视为刚体,不考虑其中各部分间的相对位移。只考虑滑移体上力的平衡,不考虑力矩的平衡,认为后者可由力的分布自行调整满足,因此在拱端作用的力系中也不考虑弯矩的影响。忽略拱坝内力重分布的影响,认为拱端作用在岩体上的力系为定值。达到极限平衡状态时,滑裂面上的剪力方向将与滑移的方向平行,指向相反,数值达到极限值。

坝肩稳定分析采用“刚体极限平衡法”,荷载组合与拱坝应力计算组合一致。根据《混凝土拱设计规范》7.2.6条,计算公式如下:

$$K_c = \frac{\sum (Nf_1 + c_1A)}{\sum T}$$

$f_1$ 和 $c_1$ 值应按相应于材料的峰值强度(小值平均值)采用。对脆性破坏的材料,采用比例极限;对塑性或脆塑性破坏的材料,采用屈服强度;对已经剪切错断过的材料,采用残余强度。

### (三) 拱坝拱端荷载计算

选取拱端单元计算其节点力,将节点力转换为单位高度坝体在该层对抗滑岩体的作用力。

### (四) 抗滑稳定计算成果

高程 (m)	拱坝稳定安全系数K(抗剪断)			
	设计工况		校核工况	
	左岸	右岸	左岸	右岸
1262	7.89	12.65	5.77	7.45
1256.5	6.66	8.25	5.58	5.3
1251	6.93	6.1	5.51	5.24
1245.5	12.15	6.52	7.38	5.15
1240	15.95	16.35	11.06	15.19

## 六、结论

通过对油菜河堵洞拱坝和溶洞围岩进行整体建模后,采用有限单元计算分析,ANSYS计算出的主拉应力的极值相对较高,出现应力集中的情况,主要是因为溶洞断面形状在左侧下部出现凹槽,坝体形出现尖角所致。经等效应力计算,应力集中部位拉应力基本满足规范要求,同时结合拱坝多年运行状况分析,左侧下部并未出现坝体开裂渗水等现象,说明在实际运行中照弹性体计算的应力应变成果是有出入的,按照应力重分布规律来看,结构实际运行后应力较计算值有所改善,运行效果良好,坝体结构是安全可靠的。根据抗滑稳定计算,抗滑稳定抗剪断安全系数均大于3.0,特殊荷载组合工况下,抗滑稳定抗剪断安全系数均大于2.5,均满足规范要求,因此拱坝坝肩抗滑结构也是安全可靠的。

### 参考文献

- [1] 万远华. 溪源砌石拱坝有限单元分析. 福州大学. 2010.
  - [2] 吴海林, 李昌刚, 周宜红. 长塘电站拱坝有限单元应力分析及坝肩稳定研究. 人民长江. 2009. 01.
  - [3] 朱伯芳. 论混凝土拱坝有限单元等效应力. 水利水电技术. 2012. 04.
  - [4] 水工设计手册(第二版)第5卷混凝土坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
  - [5] SL282-2018, 混凝土拱坝设计规范[S].
  - [6] 王敏, 武永新. 碾压混凝土拱坝三维有限单元等效应力分析[J]. 低温建筑技术, 2014, 36(1): 99-102.
  - [7] 张旭辉, 袁明道. 基于ANSYS平台的拱坝体型优化设计应用实践[J]. 广东水利水电, 2008(4): 5-8.
- 作者简介:  
符昌胜(1978.05-),男,大学本科,贵州平塘人,汉族,高级工程师,从事水工结构设计工作。  
马富强(1980.09-),男,大学本科,山东菏泽人,汉族,高级工程师,从事水工结构设计工作。  
孙光礼(1989.10-),男,大学本科,山东菏泽人,汉族,高级工程师,从事水工结构设计工作。